

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-енергетичний факультет
Кафедра агроінженерії**

**Енергоефективні та ресурсощадні технології переробних
і тваринницьких підприємств:**

методичні рекомендації для виконання самостійних робіт
для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти ОПП
«Агроінженерія» спеціальності
Н7 «Агроінженерія» денної та заочної форм здобуття вищої освіти

Миколаїв
2026

УДК 620.91:631.371

E61

Рекомендовано до друку рішенням науково-методичної комісії інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 22.09.26, протокол № 1.

Укладач:

О. А. Горбенко – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії, Миколаївський національний аграрний університет

Рецензенти:

О. С. Садовий – канд.техн. наук, доцент, завідувач кафедри агроінженерії, Миколаївський національний аграрний університет

С. М. Галімов – канд. с.г. наук, доцент, директор СГПП «Техмед-Юг»

© Миколаївський національний аграрний університет, 2026

© Горбенко О. А., 2026

ПЕРЕДМОВА

Методичні рекомендації призначені для організації та методичного забезпечення самостійної роботи здобувачів вищої освіти з дисципліни «Енергоефективні та ресурсоощадні технології переробних і тваринницьких підприємств». Зміст рекомендацій спрямований на поглиблення, систематизацію та практичне застосування знань, отриманих під час лекційних і практичних занять, а також на формування у здобувачів навичок самостійного аналізу технологічних процесів, оцінювання енергетичної та ресурсної ефективності виробничих систем і обґрунтування напрямів їх удосконалення. Тематика самостійної роботи охоплює питання структури та функціонування енергетичних систем підприємств, оцінювання енергоспоживання, підвищення ефективності використання електричної та теплової енергії, удосконалення технологічного обладнання, автоматизації виробничих процесів, використання вторинних енергетичних ресурсів, рекуперації теплоти, оптимізації режимів роботи машин і обладнання, а також упровадження сучасних ресурсоощадних технологій у переробних та тваринницьких виробництвах.

Самостійна робота за кожною темою передбачає опрацювання рекомендованої навчальної, наукової, нормативної та довідкової літератури відповідно до наведеного переліку питань. Здобувачі мають проаналізувати основні теоретичні положення теми, визначити ключові технологічні та енергетичні чинники, встановити взаємозв'язки між параметрами технологічного процесу та показниками енерго- і ресурсоефективності.

Таким чином, самостійна робота є важливою складовою вивчення дисципліни та спрямована на формування у здобувачів системного інженерного мислення, навичок самостійного пошуку й опрацювання науково-технічної інформації, виконання розрахунків, аналізу отриманих результатів та прийняття обґрунтованих технічних рішень у сфері енергоефективності та ресурсозбереження переробних і тваринницьких підприємств.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	3
ЗМІСТ	4
САМОСТІЙНА РОБОТА № 1	5
САМОСТІЙНА РОБОТА № 2	8
САМОСТІЙНА РОБОТА № 3	11
САМОСТІЙНА РОБОТА № 4	14
САМОСТІЙНА РОБОТА № 5	17
САМОСТІЙНА РОБОТА № 6	20
САМОСТІЙНА РОБОТА № 7	23
САМОСТІЙНА РОБОТА № 8	26
САМОСТІЙНА РОБОТА № 9	29
САМОСТІЙНА РОБОТА № 10	32
САМОСТІЙНА РОБОТА № 11	35
САМОСТІЙНА РОБОТА № 12	38
САМОСТІЙНА РОБОТА № 13	41
САМОСТІЙНА РОБОТА № 14	44
САМОСТІЙНА РОБОТА № 15	47
Список використаних джерел	50

САМОСТІЙНА РОБОТА № 1

Еволюція енергоефективних та ресурсощадних технологій в АПК

Мета роботи

Дослідити історичні етапи розвитку енергоефективних та ресурсощадних технологій в агропромисловому комплексі та закріпити навички аналізу структури енергоспоживання підприємства.

Питання для самостійного опрацювання

1. Основні історичні етапи розвитку енергоефективних технологій у світі та в Україні.
2. Сучасні тенденції енергозбереження в агропромисловому комплексі.
3. Роль енергетичних криз у формуванні політики енергоефективності.
4. Рівні реалізації енергоефективних заходів (організаційні, маловитратні, капіталомісткі).
5. Перспективи розвитку енергоефективних технологій у переробній і тваринницькій галузях.

Методичні рекомендації щодо виконання

Опрацювати рекомендовані джерела з історії розвитку енергоефективних технологій в АПК, підготувати короткий огляд (реферат обсягом 3–5 сторінок) основних історичних етапів і сучасних тенденцій. У розрахунковій частині виконати аналіз структури енергоспоживання заданого підприємства (за варіантом) та обчислити його енергоємність.

Розрахункові формули

$$E_{\text{заг}} = E_1 + E_2 + \dots + E_n \quad (1)$$

де $E_{\text{заг}}$ - сумарні витрати енергії підприємства за всіма видами енергоносіїв, приведені до єдиних одиниць виміру (кВт·год).

$$K_e = W_{\text{п}} / E_{\text{заг}} \quad (2)$$

де K_e - узагальнений показник енергоефективності; $W_{\text{п}}$ – обсяг випущеної продукції.

$$E_n = E_{\text{заг}} / W_{\text{п}} \quad (3)$$

де E_n - енергоємність виробництва (обернений до K_e показник).

$$e = E_{\text{заг}} / W_{\text{п}} \quad (4)$$

де e - питомі витрати енергії на одиницю продукції (у даній роботі чисельно збігаються з $E_{\text{н}}$).

$$P_{\text{ф}} = W_{\text{сп}} / 24 \quad (5)$$

де $P_{\text{ф}}$ - середня фактична потужність обладнання за добу;

$W_{\text{сп}}$ – добове споживання енергії, кВт·год.

$$K_{\text{з}} = P_{\text{ф}} / P_{\text{н}} \quad (6)$$

де $K_{\text{з}}$ - коефіцієнт завантаження обладнання; $P_{\text{н}}$ – номінальна потужність.

$$K_{\text{в.п.}} = W_{\text{сп}} / (P_{\text{н}} \cdot 24) \quad (7)$$

де $K_{\text{в.п.}}$ - коефіцієнт використання встановленої потужності за добу.

$$P_{\text{ез}} = (e_{\text{ф}} - e_{\text{б}}) / e_{\text{ф}} \cdot 100\% \quad (8)$$

де $P_{\text{ез}}$ - потенціал енергозбереження; $e_{\text{б}}$ – питомі витрати за найкращими доступними технологіями.

$$\Delta E = P_{\text{ез}} \cdot E_{\text{заг}} / 100 \quad (9)$$

де ΔE - абсолютний обсяг потенційної економії енергії, кВт·год.

$$d_{\text{вде}} = E_{\text{вде}} / E_{\text{заг}} \cdot 100\% \quad (10)$$

де $d_{\text{вде}}$ - частка відновлюваних та вторинних джерел у структурі енергоспоживання (за додатковими даними підприємства, якщо є).

Приклад розрахунку

Молокопереробне підприємство: $E_1=85000$ кВт·год (електроенергія), $E_2=42000$ кВт·год (газ, у перерахунку), $E_3=18000$ кВт·год (власна теплота). $W_{\text{п}}=620$ т, $P_{\text{н}}=75$ кВт, $W_{\text{сп}}=890$ кВт·год/добу, $e_{\text{б}}=185$ кВт·год/т.

1) $E_{\text{заг}}=85000+42000+18000=145000$ кВт·год.

2) $K_{\text{е}}=620/145000=0,00428$ т/кВт·год (або в оберненому вигляді $E_{\text{н}}$ нижче). 3) $E_{\text{н}}=145000/620=233,9$ кВт·год/т.

4) $P_{\text{ф}}=890/24=37,1$ кВт. 5) $K_{\text{з}}=37,1/75=0,49$.

6) $K_{\text{в.п.}}=890/(75 \cdot 24)=0,49$.

7) $P_{\text{ез}}=(233,9-185)/233,9 \cdot 100\%=20,9\%$.

8) $\Delta E=20,9 \cdot 145000/100=30305$ кВт·год – обсяг потенційної економії за звітний період.

Висновок: підприємство має суттєвий (близько 21%) резерв енергозбереження, а обладнання завантажене менш ніж наполовину від номінальної потужності, що потребує додаткового аналізу графіка роботи.

Завдання для самостійного виконання

За заданими у варіанті даними виконати повний комплекс розрахунків: обчислити сумарні витрати енергії Езаг, енергоємність Ен, коефіцієнти Кз і Кв.п., потенціал енергозбереження Пез та абсолютний обсяг потенційної економії ΔE . Зробити висновок щодо резервів підвищення енергоефективності підприємства.

Варіант	Підприємство	Е1 (ел.), кВт·год	Е2 (газ), кВт·год	Е3 (тепло), кВт·год	Wп, т	Рп, кВт	Wсп, кВт·год/ добу	еб, кВт·год/т
1	Молокозавод	70000	30000	10000	500	60	700	160
2	Комбикормовий завод	73500	31800	10700	525	63	735	165
3	М'ясокомбінат	77000	33600	11400	550	66	770	170
4	Птахофабрика	80500	35400	12100	575	69	805	175
5	Хлібозавод	84000	37200	12800	600	72	840	180
6	Олійноекстракційний завод	87500	39000	13500	625	75	875	185

Питання для самоконтролю

1. Охарактеризуйте ієрархічні рівні енергоспоживання переробних і тваринницьких підприємств.
2. Як обчислюється енергоємність виробництва і для чого вона використовується?
3. Які показники енергетичної ефективності застосовуються на рівні підприємства в цілому?
4. Чому порівняння з галузевим нормативом є важливим етапом аналізу?
5. Наведіть приклад резерву енергозбереження, виявленого на основі аналізу структури енергоспоживання.
6. Як пов'язані коефіцієнт завантаження та коефіцієнт використання встановленої потужності обладнання?
7. Що означає обсяг потенційної економії енергії ΔE і як він обчислюється?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 2

Основні принципи енергозбереження у переробних підприємствах

Мета роботи

Поглибити знання основних принципів енергозбереження у переробних підприємствах та оволодіти методикою розрахунку теплового балансу технологічного процесу.

Питання для самостійного опрацювання

1. Поняття енергозбереження та його відмінність від енергоефективності.
2. Основні принципи зниження енергоємності технологічних процесів переробки.
3. Технологічне і нетехнологічне енергоспоживання процесу.
4. Роль теплового балансу в аналізі процесу переробки.
5. Типові резерви енергозбереження на переробних підприємствах.

Методичні рекомендації щодо виконання

Опрацювати теоретичний матеріал щодо структури енергоспоживання технологічного процесу, виконати тепловий розрахунок заданого процесу сушіння (випаровування) з обчисленням коефіцієнта використання теплоти.

Розрахункові формули

$$Q_{\text{теор}} = m \cdot r \quad (1)$$

де $Q_{\text{теор}}$ - теоретично необхідна кількість теплоти; m – маса видаленої вологи, кг; r – питома теплота пароутворення ($=0,628$ кВт·год/кг).

$$\eta_t = Q_{\text{теор}} / Q_{\text{факт}} \cdot 100\% \quad (2)$$

де η_t - коефіцієнт використання теплоти технологічного процесу.

$$Q_{\text{втр}} = Q_{\text{факт}} - Q_{\text{теор}} \quad (3)$$

де $Q_{\text{втр}}$ - абсолютні втрати теплоти в процесі.

$$e = Q_{\text{факт}} / M \quad (4)$$

де e - питомі витрати енергії на одиницю продукції, кВт·год/т.

$$P_{\text{сер}} = Q_{\text{факт}} / \tau \quad (5)$$

де $R_{сер}$ - середня теплова потужність процесу; τ – тривалість процесу, год.

$$q_{пит} = Q_{факт} / m \quad (6)$$

де $q_{пит}$ - питомі витрати енергії на одиницю видаленої вологи, кВт·год/кг.

$$K_v = Q_{теор} / (M \cdot r_0) \quad (7)$$

де K_v - коефіцієнт відносної вологовіддачі (довідкове r_0 приймається 0,63 кВт·год/кг для орієнтовних розрахунків).

$$\Delta Q(t) = Q_{факт} \cdot k \cdot (t - t_0) \quad (8)$$

де $\Delta Q(t)$ - приріст витрат теплоти при відхиленні температури процесу t від базової $t_0=55^\circ\text{C}$ (приймати $k=0,01$ на кожен $^\circ\text{C}$ для орієнтовної оцінки).

Приклад розрахунку

Зерносушарка: $m=1200$ кг вологи, $Q_{факт}=1100$ кВт·год, $M=15$ т, $\tau=6$ год, $t=55^\circ\text{C}$.

1) $Q_{теор}=1200 \cdot 0,628=753,6$ кВт·год.

2) $\eta_t=753,6/1100 \cdot 100\%=68,5\%$.

3) $Q_{втр}=1100-753,6=346,4$ кВт·год.

4) $e=1100/15=73,3$ кВт·год/т.

5) $R_{сер}=1100/6=183,3$ кВт.

6) $q_{пит}=1100/1200=0,917$ кВт·год/кг.

7) $K_v=753,6/(15 \cdot 0,63)=79,7$ – довідковий показник для порівняння з аналогічними установками.

Висновок: коефіцієнт використання теплоти 68,5% відповідає типовому діапазону для конвективних сушарок (60–70%), середня теплова потужність 183,3 кВт визначає вимоги до потужності теплогенератора.

Завдання для самостійного виконання

За заданими у варіанті даними виконати повний тепловий розрахунок процесу: обчислити $Q_{теор}$, η_t , $Q_{втр}$, питомі витрати енергії e та $q_{пит}$, середню теплову потужність процесу $R_{сер}$. Порівняти отримане значення η_t з типовим діапазоном (60–70%) і зробити висновок про ефективність процесу.

Вар.	Процес	m, кг (волога)	Qфакт, кВт·год	M, т (продукція)	τ, год (тривалість)	t, °C (температура)
1	Сушіння зерна (шахтна)	1200	1100	15	6	55
2	Сушіння насіння соняшнику	1260	1155	16.5	6.3	57
3	Випарювання сироватки	1320	1210	18	6.6	59
4	Сушіння трав'яного борошна	1380	1265	19.5	6.9	61
5	Сушіння овочів	1440	1320	21	7.2	63
6	Сушіння фруктів	1500	1375	22.5	7.5	65

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення технологічного і нетехнологічного енергоспоживання.
2. Як обчислюється теоретично необхідна кількість теплоти на сушіння?
3. Що показує коефіцієнт використання теплоти технологічного процесу?
4. Які фактори спричиняють різницю між теоретичними і фактичними витратами теплоти?
5. Який типовий діапазон коефіцієнта використання теплоти для конвективних сушарок?
6. Як обчислюється середня теплова потужність процесу і для чого вона потрібна?
7. Що показує показник питомих витрат енергії на одиницю видаленої вологи?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 3

Системний підхід до аналізу енергоефективності складних виробничих процесів

Мета роботи

Розвинути навички системного підходу до аналізу енергоефективності складних виробничих процесів через визначення потенціалу енергозбереження підприємства.

Питання для самостійного опрацювання

1. Принципи системного аналізу енергоефективності підприємства.
2. Поняття технічно досяжного рівня енергоефективності (ВАТ).
3. Методика визначення потенціалу енергозбереження.
4. Декомпозиція енергетичної системи підприємства на підсистеми.
5. Комплексний показник енергоефективності та його структура.

Методичні рекомендації щодо виконання

Вивчити принципи системного аналізу енергоефективності, для заданого підприємства обчислити потенціал енергозбереження відносно технічно досяжного рівня та комплексний показник енергоефективності.

Розрахункові формули

$$\text{Пез} = (\text{еф} - \text{еб}) / \text{еф} \cdot 100\% \quad (1)$$

де Пез - потенціал енергозбереження підприємства.

$$\text{еб}/\text{еф} = a \quad (2)$$

де еб/еф - відносний рівень наближеності підприємства до технічно досяжного рівня, частка одиниці.

$$\Delta E_{\text{рік}} = \text{Пез} \cdot \text{еф} \cdot Q_{\text{річ}} / 100 \quad (3)$$

де $\Delta E_{\text{рік}}$ - річний обсяг потенційної економії енергії за заданого річного обсягу виробництва $Q_{\text{річ}}$.

$$K_e = \sum (w_i \cdot e_i), i=1..3 \quad (4)$$

де K_e - комплексний показник енергоефективності; w_i – вагові коефіцієнти ($\sum w_i=1$); e_i – нормовані оцінки одиничних показників.

$$K_{\text{max}} = \sum (w_i \cdot 1) \quad (5)$$

де $K_{\max}$ - максимально можливе значення комплексного показника (за $e_i=1$ для всіх показників), еталон $K_{\max}=1$.

$$\Delta K = K_{\max} - K_e \quad (6)$$

де ΔK - відхилення фактичного комплексного показника від еталонного значення.

$$R_{\text{показника } i} = w_i \cdot (1 - e_i) \quad (7)$$

де $R_{\text{показника } i}$ - внесок i -го показника в загальне відхилення ΔK – дає змогу визначити пріоритетний напрям поліпшення.

$$K_{e.\text{norm}} = K_e / K_{\max} \cdot 100\% \quad (8)$$

де $K_{e.\text{norm}}$ - комплексний показник енергоефективності у відсотковому вираженні відносно еталону.

Приклад розрахунку

$$e_{\text{ф}}=234 \quad \text{кВт}\cdot\text{год/т}, \quad e_{\text{б}}=185 \quad \text{кВт}\cdot\text{год/т}.$$

$$P_{\text{ез}}=(234-185)/234 \cdot 100\%=20,9\%. \quad a=185/234=0,79.$$

Комплексна оцінка за трьома показниками: $w=(0,4; 0,35; 0,25)$,
 $e=(0,88; 0,82; 0,60)$.

$$K_e=0,4 \cdot 0,88+0,35 \cdot 0,82+0,25 \cdot 0,60=0,352+0,287+0,15=0,789.$$

$$K_{\max}=1. \quad \Delta K=1-0,789=0,211.$$

Внески у відхилення: $R_1=0,4 \cdot 0,12=0,048$; $R_2=0,35 \cdot 0,18=0,063$;
 $R_3=0,25 \cdot 0,40=0,10$ – найбільший внесок дає третій показник (найімовірніше, частка ВДЕ).

$K_{e.\text{norm}}=0,789/1 \cdot 100\%=78,9\%$ – середній рівень енергоефективності; пріоритетний напрям поліпшення – показник із найбільшим внеском R_3 .

Завдання для самостійного виконання

За заданими фактичними та ВАТ-показниками обчислити потенціал енергозбереження $P_{\text{ез}}$; за заданими ваговими коефіцієнтами та оцінками одиничних показників обчислити комплексний показник K_e , відхилення ΔK та внесок кожного показника R_i у це відхилення. Визначити пріоритетний напрям поліпшення енергоефективності.

Вар.	Підприємство	еф, кВт·год/т	еб, кВт·год/т	w1;w2;w3	e1;e2;e3
1	Молокозавод	220	175	0,4;0,35;0,25	0,88;0,82;0,60
2	Зернопереробний комбінат	228	181	0,45;0,30;0,25	0,90;0,80;0,65
3	М'ясокомбінат	236	187	0,35;0,40;0,25	0,85;0,78;0,70
4	Комбікормовий завод	244	193	0,40;0,25;0,35	0,92;0,75;0,55
5	Хлібозавод	252	199	0,50;0,30;0,20	0,80;0,85;0,60
6	Цукровий завод	260	205	0,35;0,35;0,30	0,87;0,83;0,58

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає системний підхід до аналізу енергоефективності виробничих процесів?
2. Що таке технічно досяжний рівень енергоефективності (ВАТ)?
3. Як обчислюється потенціал енергозбереження підприємства?
4. Які підсистеми виділяють при декомпозиції енергетичної системи підприємства?
5. Чому системний (а не поелементний) аналіз дає більш повну картину резервів економії?
6. Як визначається пріоритетний напрям поліпшення енергоефективності за структурою внесків показників?
7. Що показує відхилення ΔK комплексного показника від еталонного значення?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 4

Класифікація енергоспоживчого обладнання тваринницьких підприємств та його характеристика

Мета роботи

Систематизувати знання про класифікацію енергоспоживчого обладнання тваринницьких підприємств та оволодіти методикою оцінювання його завантаження.

Питання для самостійного опрацювання

1. Ознаки класифікації енергоспоживчого обладнання тваринницьких підприємств.
2. Особливості енергоспоживання систем мікроклімату тваринницьких приміщень.
3. Показники оцінювання енергоефективності обладнання (Кз, Кв.п.).
4. Класи енергоефективності електродвигунів (IE1–IE4).
5. Вплив режиму часткового навантаження на фактичний ККД обладнання.

Методичні рекомендації щодо виконання

Систематизувати класифікаційні ознаки енергоспоживчого обладнання тваринницьких підприємств у вигляді таблиці, виконати розрахунок коефіцієнтів завантаження та використання встановленої потужності заданого обладнання.

Розрахункові формули

$$P_{\text{ф}} = W_{\text{сп}} / 24 \quad (1)$$

де $P_{\text{ф}}$ - середня фактична потужність обладнання за добу.

$$K_z = P_{\text{ф}} / P_{\text{н}} \quad (2)$$

де K_z - коефіцієнт завантаження обладнання.

$$K_{\text{в.п.}} = W_{\text{сп}} / (P_{\text{н}} \cdot 24) \quad (3)$$

де $K_{\text{в.п.}}$ - коефіцієнт використання встановленої потужності за добу.

$$\eta_{\text{факт}} = \eta_{\text{пасп}} \cdot (0,5 + 0,5 \cdot K_z) \quad (4)$$

де $\eta_{\text{факт}}$ - спрощена оцінка фактичного ККД обладнання в режимі часткового навантаження (емпірична залежність).

$$\Delta P = P_{\text{н}} - P_{\text{ф}} \quad (5)$$

де ΔP - резерв (недовикористана потужність) обладнання, кВт.

$$W_{\text{рік}} = W_{\text{сп}} \cdot 365 \quad (6)$$

де $W_{\text{рік}}$ - орієнтовне річне споживання енергії обладнанням.

$$W_{\text{рік IE}} = W_{\text{рік}} \cdot (\eta_{\text{IE1}} / \eta_{\text{IE}_{\text{поточний}}}) \quad (7)$$

де $W_{\text{рік IE}}$ - порівняльне річне споживання за умовної заміни на клас IE1 (базовий); $\eta_{\text{IE1}}=0,91$ для оцінки, $\eta_{\text{IE}_{\text{поточний}}}$ – паспортний ККД у частках.

$$\Delta W_{\text{екон}} = W_{\text{рік}} - W_{\text{рік вищий клас}} \quad (8)$$

де $\Delta W_{\text{екон}}$ - очікувана економія енергії за заміни обладнання на вищий клас енергоефективності (за додатковим завданням викладача).

Приклад розрахунку

Компресорна холодильна установка: $P_n=75$ кВт, $W_{\text{сп}}=890$ кВт·год/добу, клас IE3, $\eta_{\text{пасп}}=93\%$.

1) $P_f=890/24=37,1$ кВт.

2) $K_z=37,1/75=0,49$.

3) $K_{\text{в.п.}}=890/(75 \cdot 24)=0,49$.

4) $\eta_{\text{факт}}=93 \cdot (0,5+0,5 \cdot 0,49)=93 \cdot 0,745=69,3\%$ – фактичний ККД суттєво нижчий за паспортний через часткове навантаження.

5) $\Delta P=75-37,1=37,9$ кВт – резерв потужності.

6) $W_{\text{рік}}=890 \cdot 365=324850$ кВт·год/рік.

Висновок: значний недобір навантаження ($K_z=0,49$) призводить до суттєвого зниження фактичного ККД навіть за високого класу енергоефективності обладнання, що обґрунтовує доцільність перегляду підбору потужності обладнання під фактичне навантаження.

Завдання для самостійного виконання

Вар.	Обладнання	P_n , кВт	$W_{\text{сп}}$, кВт·год/добу	T , год	Кл. енергоефект. (IE)	ККД паспортний, %
1	Холодильна установка	65	780	20	90	IE2
2	Компресорна станція	69	835	21	90.3	IE3

3	Насосна станція	73	890	22	90.6	IE1
4	Вентиляційна установка	77	945	23	90.9	IE2
5	Молочний сепаратор	81	1000	24	91.2	IE3
6	Кормороздавач	85	1055	25	91.5	IE4

За заданими у варіанті даними обчислити R_f , K_z , $K_v.p.$, оцінити фактичний ККД обладнання $\eta_{факт}$ за наведеною емпіричною залежністю, визначити резерв потужності ΔP та орієнтовне річне споживання $W_{рік}$. Зробити висновок про доцільність перегляду підбору потужності обладнання.

Питання для самоконтролю

1. За якими ознаками класифікують енергоспоживче обладнання переробних підприємств?
2. Як обчислюється коефіцієнт завантаження обладнання?
3. Що показує коефіцієнт використання встановленої потужності?
4. Про що свідчить систематично низьке значення цих коефіцієнтів?
5. Які класи енергоефективності застосовуються для електродвигунів (IE1–IE4)?
6. Як фактичний ККД обладнання залежить від коефіцієнта завантаження?
7. Що означає резерв потужності обладнання ΔP і як його враховують при плануванні?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 5

Основи математичного опису енергоспоживання виробничих процесів

Мета роботи

Оволодіти основами математичного опису енергоспоживання виробничих процесів через побудову та застосування регресійної моделі.

Питання для самостійного опрацювання

1. Поняття математичної моделі енергетичного процесу.
2. Детерміновані та стохастичні моделі енергоспоживання.
3. Побудова регресійної моделі другого порядку.
4. Перевірка адекватності моделі за коефіцієнтом детермінації.
5. Пряма та обернена задачі моделювання енергоспоживання.

Методичні рекомендації щодо виконання

Опрацювати методику побудови регресійних моделей енергоспоживання, виконати розрахунок за наданою моделлю та знайти оптимальний режим у межах технологічно допустимого діапазону.

Розрахункові формули

$$E(t,v) = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot v + b_{11} \cdot t^2 \quad (1)$$

де $E(t,v)$ - регресійна модель енергоспоживання другого порядку за факторами t (температура) та v (швидкість).

$$\partial E / \partial t = b_1 + 2 \cdot b_{11} \cdot t \quad (2)$$

де $\partial E / \partial t$ - часткова похідна моделі за температурним фактором.

$$\partial E / \partial t = 0 \rightarrow t_{\text{опт}} = -b_1 / (2 \cdot b_{11}) \quad (3)$$

де $\partial E / \partial$ - умова екстремуму (оптимальна температура) за фіксованого значення v .

$$E_{\text{опт}} = E(t_{\text{опт}}, v) \quad (4)$$

де $E_{\text{опт}}$ - значення енергоспоживання за оптимальної температури.

$$R^2 = 1 - SSE / SST \quad (5)$$

де R^2 - коефіцієнт детермінації моделі; SSE - залишкова сума квадратів; SST - загальна сума квадратів відхилень.

$$\hat{E}(t,v) - E_{\text{факт}} = \delta \quad (6)$$

де $\hat{E}(t,v)$ - похибка моделі в конкретній контрольній точці, що використовується для оцінювання SSE.

$$E_{\text{сер}} = (1/n) \cdot \sum E_i \quad (7)$$

де $E_{\text{сер}}$ - середнє значення відгуку за вибіркою, необхідне для обчислення SST.

$$\Delta E\% = (E(t_1,v) - E(t_2,v))/E(t_2,v) \cdot 100\% \quad (8)$$

де Відносна зміна енергоспоживання при зміні температурного режиму з t_2 на t_1 .

Приклад розрахунку

Модель сушарки: $E(t,v)=500-8t+30v+0,1t^2$ (у діапазоні $t=60\ldots90^\circ\text{C}$, $v=1\ldots3$ м/с). Задані $t=70$, $v=1,8$.

1) $E(70;1,8)=500-8 \cdot 70+30 \cdot 1,8+0,1 \cdot 70^2=500-560+54+490=484$ кВт·год/т.

2) $\partial E/\partial t=-8+0,2t$; умова екстремуму: $-8+0,2t=0 \rightarrow t_{\text{опт}}=40^\circ\text{C}$ – поза технологічно допустимим діапазоном ($60\ldots90^\circ\text{C}$), отже в межах діапазону мінімум досягається на нижній межі $t=60^\circ\text{C}$.

3) $E(60;1,8)=500-480+54+360=434$ кВт·год/т – саме цей режим (нижня технологічна межа) є енергетично найвигіднішим у межах допустимого діапазону.

4) Порівняння з $t=70^\circ\text{C}$: $\Delta E\%=(484-434)/434 \cdot 100\%=11,5\%$ – робота при $t=70^\circ\text{C}$ замість $t=60^\circ\text{C}$ споживає на 11,5% більше енергії за інших однакових умов.

Завдання для самостійного виконання

За наведеними коефіцієнтами моделі (за варіантом) обчислити $E(t,v)$ для заданих значень факторів; знайти $t_{\text{опт}}$ за формулою екстремуму та перевірити, чи належить це значення допустимому діапазону $60\ldots90^\circ\text{C}$; якщо ні – визначити енергетично вигіднішу межу діапазону; обчислити відносну зміну $\Delta E\%$ між заданим і оптимальним режимами.

Вар.	Процес	t, °C	v, м/с	b0	b1(t)	b2(v)	b11(t²)
1	Сушіння зерна	70	1.8	500	-8	30	0.1

Вар.	Процес	t, °C	v, м/с	b0	b1(t)	b2(v)	b11(t ²)
2	Пастеризація молока	72	1.86	512	-8.3	31.2	0.105
3	Охолодження продукції	73	1.92	524	-8.6	32.4	0.11
4	Термообробка м'яса	75	1.98	536	-8.9	33.6	0.115
5	Випарювання соку	76	2.04	548	-9.2	34.8	0.12
6	Сушіння овочів	78	2.1	560	-9.5	36	0.125

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення математичної моделі енергетичного процесу.
2. У чому різниця між детермінованою та стохастичною моделлю?
3. Як обчислюється коефіцієнт детермінації R^2 і що він показує?
4. Які етапи включає побудова регресійної моделі енергоспоживання?
5. Для чого виконується верифікація моделі на незалежній вибірці даних?
6. Як розв'язується обернена задача моделювання на основі регресійної моделі?
7. Що робити, якщо розрахункове оптимальне значення параметра виходить за межі технологічно допустимого діапазону?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 6

Вплив енергетичних параметрів на ефективність виробництва

Мета роботи

Дослідити вплив енергетичних параметрів на ефективність виробництва та закріпити методику визначення оптимального режиму процесу.

Питання для самостійного опрацювання

1. Основні енергетичні параметри технологічного процесу.
2. Характер залежності питомих витрат енергії від режимного параметра.
3. Методи регулювання енергоощадних режимів роботи обладнання.
4. Частотне та каскадне регулювання приводів.
5. Визначення оптимального значення параметра методом диференціювання.

Методичні рекомендації щодо виконання

Дослідити характер залежності питомих витрат енергії від технологічного параметра, визначити оптимальне значення параметра методом диференціювання заданої функції.

Розрахункові формули

$$e(x) = a + b \cdot x + c \cdot x^2 \quad (1)$$

де $e(x)$ - функція питомих витрат енергії від параметра x .

$$de/dx = b + 2c \cdot x \quad (2)$$

де de/dx - похідна функції питомих витрат.

$$de/dx = 0 \rightarrow \text{хопт} = -b/(2c) \quad (3)$$

де хопт - координата екстремуму (оптимальне значення параметра).

$$e_{\text{опт}} = e(\text{хопт}) \quad (4)$$

де $e_{\text{опт}}$ - мінімальне значення питомих витрат за оптимального параметра (за умови $\text{хопт} \in [x_{\min}; x_{\max}]$).

$$e(x_{\min}), e(x_{\max}) \quad (5)$$

де $e(x_{\min}), e(x_{\max})$ - значення функції на межах допустимого діапазону – використовуються, якщо хопт виходить за межі діапазону.

$$\Delta e_{\text{ВІДН}} = (e_{\text{факт}} - e_{\text{опт}}) / e_{\text{опт}} \cdot 100\% \quad (6)$$

де $\Delta e_{\text{ВІДН}}$ - відносне перевищення фактичних питомих витрат над оптимальними для довільного фактичного режиму $x_{\text{факт}}$ (приймати $x_{\text{факт}} = (x_{\text{мін}} + x_{\text{макс}}) / 2$ як типовий поточний режим господарства).

$$\Delta B_{\text{рік}} = \Delta e \cdot M_{\text{річ}} \quad (7)$$

де $\Delta B_{\text{рік}}$ - річна економія витрат енергії при переході на оптимальний режим; $M_{\text{річ}}$ - річний обсяг виробництва (приймати 5000 т для орієнтовного розрахунку).

$$d^2e/dx^2 = 2c \quad (8)$$

де d^2e/dx^2 - друга похідна - перевірка характеру екстремуму (мінімум, якщо $2c > 0$).

Приклад розрахунку

$e(t) = 45 - 0,8t + 0,006t^2$, діапазон $t = 63 \dots 90^\circ\text{C}$. $de/dt = -0,8 + 0,012t = 0 \rightarrow t_{\text{опт}} = 66,7^\circ\text{C} \in [63; 90]$ - оптимум належить діапазону.

$$e_{\text{опт}} = 45 - 0,8 \cdot 66,7 + 0,006 \cdot 66,7^2 = 45 - 53,4 + 26,7 = 18,3 \quad \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{т}.$$

Перевірка: $2c = 0,012 > 0$ - це справді мінімум.

Типовий поточний режим господарства
 $t_{\text{факт}} = (63 + 90) / 2 = 76,5^\circ\text{C}$:

$$e(76,5) = 45 - 0,8 \cdot 76,5 + 0,006 \cdot 76,5^2 = 45 - 61,2 + 35,1 = 18,9 \quad \text{кВт} \cdot \text{год} / \text{т}.$$

$\Delta e_{\text{ВІДН}} = (18,9 - 18,3) / 18,3 \cdot 100\% = 3,3\%$ - відносно невелике перевищення, оскільки типовий режим близький до оптимуму.

За $M_{\text{річ}} = 5000$ т: $\Delta B_{\text{рік}} = (18,9 - 18,3) \cdot 5000 = 3000$ кВт·год/рік - додаткова енергія, що витрачається через відхилення від оптимального режиму.

Завдання для самостійного виконання

За наведеною функцією $e(x)$ та межами діапазону $[x_{\text{мін}}; x_{\text{макс}}]$ знайти $x_{\text{опт}}$, перевірити його належність діапазону, обчислити $e_{\text{опт}}$; обчислити e для типового поточного режиму $x_{\text{факт}} = (x_{\text{мін}} + x_{\text{макс}}) / 2$ та відносне перевищення $\Delta e_{\text{ВІДН}}$; обчислити річну економію $\Delta B_{\text{рік}}$ за $M_{\text{річ}} = 5000$ т.

Вар.	Процес	a (b0)	b (b1)	c (b11, x ²)	xmin	xmax
1	Пастеризація молока	45	-0.8	0.006	63	90
2	Сушіння зерна (продукт.)	47	-0.82	0.0063	64	91.5
3	Обробіток ґрунту	49	-0.84	0.0066	65	93
4	Подрібнення кормів	51	-0.86	0.0069	66	94.5
5	Охолодження продукції	53	-0.88	0.0072	67	96
6	Стерилізація консервів	55	-0.9	0.0075	68	97.5

Питання для самоконтролю

1. Чому залежність питомих витрат енергії від параметра має екстремальний характер?
2. Як визначається оптимальне значення енергетичного параметра методом диференціювання?
3. Які способи регулювання енергоощадних режимів роботи обладнання застосовуються?
4. Чому частотне регулювання є енергоефективнішим за дросельне?
5. Як періодичність перегляду оптимальних режимів пов'язана з технічним обслуговуванням обладнання?
6. Як перевірити, що знайдена стаціонарна точка є саме мінімумом функції питомих витрат?
7. Як обчислюється річна економія витрат енергії при переході на оптимальний режим?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 7

Методи оцінювання енергоефективності переробки сільськогосподарської продукції

Мета роботи

Поглибити знання методів оцінювання енергоефективності переробки продукції та оволодіти розрахунком комплексного показника енергоефективності.

Питання для самостійного опрацювання

1. Поняття енергоефективності виробництва продукції.
2. Кількісні та якісні показники енергоефективності.
3. Методи контролю енергоефективності на підприємстві.
4. Стандарти ISO 50001 та їх роль в управлінні енергоефективністю.
5. Комплексний показник енергоефективності та структура його формування.

Методичні рекомендації щодо виконання

Опрацювати систему одиничних показників енергоефективності, обчислити комплексний показник за наведеними вагами та оцінками, визначити пріоритетний напрям поліпшення.

Розрахункові формули

$$K_e = \sum(w_i \cdot e_i), i=1..4 \quad (1)$$

де K_e - комплексний показник енергоефективності за чотирма показниками; $\sum w_i = 1$.

$$\text{Внесок } i = w_i \cdot e_i \quad (2)$$

де Внесок i - абсолютний внесок i -го показника в комплексну оцінку.

$$\text{Частка } i = (w_i \cdot e_i) / K_e \cdot 100\% \quad (3)$$

де Частка i - відносна частка i -го показника у сформованому значенні K_e .

$$\Delta K_{\max} = \sum w_i \cdot (1 - e_i) = 1 - K_e \quad (4)$$

де $\Delta K_{\max}$ - сумарний резерв поліпшення комплексного показника до еталонного значення 1.

$$R_i = w_i \cdot (1 - e_i) \quad (5)$$

де R_i - внесок i -го показника в сумарний резерв поліпшення $\Delta K_{\max}$.

$$R_{\max} = \max(R_i) \quad (6)$$

де $R_{\max}$ - показник із найбільшим резервом поліпшення – пріоритетний напрям вдосконалення.

$$K_{e.\text{norm}} = K_e \cdot 100\% \quad (7)$$

де $K_{e.\text{norm}}$ - комплексний показник у відсотковому вираженні.

$$\text{Клас} = f(K_{e.\text{norm}}) \quad (8)$$

де Клас - умовна класифікація рівня енергоефективності: $K_{e.\text{norm}} \geq 85\%$ – високий, 70–85% – середній, $< 70\%$ – низький (довідкова шкала).

Приклад розрахунку

$$w=(0,3; 0,3; 0,2; 0,2), e=(0,90; 0,85; 0,60; 0,75).$$

$$K_e=0,3 \cdot 0,90+0,3 \cdot 0,85+0,2 \cdot 0,60+0,2 \cdot 0,75=0,27+0,255+0,12+0,15=0,795.$$

Внески: 0,27; 0,255; 0,12; 0,15 – частки: 34,0%; 32,1%; 15,1%; 18,9%.

$\Delta K_{\max}=1-0,795=0,205$. R_i : $R_1=0,3 \cdot 0,10=0,03$; $R_2=0,3 \cdot 0,15=0,045$; $R_3=0,2 \cdot 0,40=0,08$; $R_4=0,2 \cdot 0,25=0,05$. $R_{\max}=R_3=0,08$ – третій показник (найімовірніше, частка ВДЕ) має найбільший резерв поліпшення.

$K_{e.\text{norm}}=79,5\%$ – середній рівень енергоефективності підприємства (за шкалою 70–85%).

Завдання для самостійного виконання

За заданими ваговими коефіцієнтами та оцінками чотирьох одиничних показників обчислити комплексний показник K_e , структуру внесків кожного показника (абсолютні та відносні), сумарний резерв поліпшення $\Delta K_{\max}$ і внески R_i ; визначити показник із найбільшим резервом поліпшення та класифікувати рівень енергоефективності підприємства.

Вар.	Підприємство	w1;w2;w3;w4	e1;e2;e3;e4
1	Молокозавод	0,3;0,3;0,2;0,2	0,90;0,85;0,60;0,75
2	М'ясокомбінат	0,35;0,25;0,25;0,15	0,85;0,80;0,65;0,70
3	Зерносушильний комплекс	0,25;0,35;0,20;0,20	0,88;0,82;0,58;0,78
4	Тваринницький комплекс	0,30;0,20;0,30;0,20	0,92;0,78;0,62;0,72
5	Хлібозавод	0,25;0,25;0,25;0,25	0,80;0,88;0,55;0,80
6	Цукровий завод	0,35;0,30;0,15;0,20	0,86;0,84;0,60;0,74

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення енергоефективності виробництва.
2. У чому різниця між кількісними та якісними показниками енергоефективності?
3. Як обчислюється комплексний показник енергоефективності підприємства?
4. Яку роль відіграють стандарти ISO 50001 в управлінні енергоефективністю?
5. Охарактеризуйте класи енергоефективності електродвигунів IE1–IE4.
6. Як визначається показник із найбільшим резервом поліпшення серед одиничних показників?
7. За якою шкалою класифікують рівень енергоефективності підприємства за значенням $K_{e,norm}$?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 8

Оптимізаційні моделі енергоспоживання в аграрному виробництві

Мета роботи

Систематизувати оптимізаційні моделі енергоспоживання в аграрному виробництві та оволодіти методикою розв'язання задачі мінімізації сумарних витрат.

Питання для самостійного опрацювання

1. Поняття оптимізації енергоспоживання технологічного процесу.
2. Критерії оптимальності енергоспоживання.
3. Математичні методи розв'язання задач оптимізації.
4. Обмеження паливно-енергетичних ресурсів у задачах оптимізації.
5. Баланс енергоефективності та витрат на її досягнення.

Методичні рекомендації щодо виконання

Розглянути постановку задачі оптимізації енергоспоживання для заданого процесу, визначити оптимальне значення регульованого параметра за критерієм мінімуму сумарних витрат.

Розрахункові формули

$$Z(x) = A/x + B \cdot x^2 \quad (1)$$

де $Z(x)$ - сумарні витрати як функція регульованого параметра x .

$$dZ/dx = -A/x^2 + 2B \cdot x \quad (2)$$

де dZ/dx - похідна сумарних витрат.

$$dZ/dx = 0 \rightarrow x_{\text{опт}} = (A/(2B))^{(1/3)} \quad (3)$$

де $x_{\text{опт}}$ - умова мінімуму; координата оптимального значення параметра.

$$Z_{\text{min}} = Z(x_{\text{опт}}) \quad (4)$$

де Z_{min} - мінімальне значення сумарних витрат.

$$Z(x_{\text{min}}), Z(x_{\text{max}}) \quad (5)$$

де $Z(x_{\text{min}}), Z(x_{\text{max}})$ - значення функції на межах діапазону – для перевірки, чи належить $x_{\text{опт}}$ технологічно допустимій області.

$$d^2Z/dx^2 = 2A/x^3 + 2B \quad (6)$$

де d^2Z/dx^2 - друга похідна – підтверджує, що знайдена точка є мінімумом (додатне значення).

$$Z_{\text{тип}} = Z((x_{\min} + x_{\max})/2) \quad (7)$$

де $Z_{\text{тип}}$ - сумарні витрати за типового поточного (не оптимізованого) режиму господарства.

$$\text{Економія} = Z_{\text{тип}} - Z_{\min} \quad (8)$$

де Економія - абсолютна економія витрат при переході від типового до оптимального режиму.

Приклад розрахунку

$Z_e(x) = 3000/x$, $Z_k(x) = 12x^2$, діапазон $x = 5 \dots 30$. $Z(x) = 3000/x + 12x^2$.

1) $x_{\text{опт}} = (3000/(2 \cdot 12))^{(1/3)} = (125)^{(1/3)} = 5$ – на нижній межі діапазону (або близько до неї залежно від точних значень А, В).

2) $Z_{\min} = Z(5) = 3000/5 + 12 \cdot 25 = 600 + 300 = 900$.

3) Друга похідна: $d^2Z/dx^2 = 2 \cdot 3000/125 + 24 = 48 + 24 = 72 > 0$ – підтверджено мінімум.

4) Типовий режим $x_{\text{тип}} = (5 + 30)/2 = 17,5$:
 $Z(17,5) = 3000/17,5 + 12 \cdot 17,5^2 = 171,4 + 3675 = 3846,4$.

5) Економія $= 3846,4 - 900 = 2946,4$ – перехід від типового до оптимального режиму дає суттєве зниження сумарних витрат.

Завдання для самостійного виконання

За заданими коефіцієнтами А, В та межами діапазону обчислити $x_{\text{опт}}$, перевірити належність діапазону $[x_{\min}; x_{\max}]$, обчислити $Z_{\min}$; обчислити Z для типового поточного режиму $x_{\text{тип}} = (x_{\min} + x_{\max})/2$ та економію при переході до оптимального режиму.

Вар.	Процес	А (у $Z_e = A/x$)	В (у $Z_k = B \cdot x^2$)	$x_{\min}$	$x_{\max}$
1	Внесення добрив	3000	12	5	30
2	Модернізація компресорної станції	3150	12.6	5.3	31.5
3	Захист рослин	3300	13.2	5.6	33
4	Полив	3450	13.8	5.9	34.5
5	Опалення теплиці	3600	14.4	6.2	36
6	Вентиляція приміщення	3750	15	6.5	37.5

Питання для самоконтролю

1. Сформулюйте загальну постановку задачі оптимізації енергоспоживання.
2. Які критерії оптимальності застосовуються в задачах енергозбереження?
3. Охарактеризуйте математичні методи розв'язання задач оптимізації енергоспоживання.
4. Як тарифна політика енергопостачання впливає на задачу оптимізації графіка навантаження?
5. У чому полягає задача пошуку балансу енергоефективності та витрат?
6. Як перевірити, що знайдена точка хопт дійсно є мінімумом функції сумарних витрат?
7. Як обчислюється економія витрат при переході від типового до оптимального режиму?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 9

Надійність і довговічність енергоощадних технологічних систем

Мета роботи

Дослідити показники надійності й довговічності енергоощадних технологічних систем та оволодіти методикою розрахунку надійності системи послідовних елементів.

Питання для самостійного опрацювання

1. Поняття надійності енергоощадної технологічної системи.
2. Причини відмов і збоїв енергетичного обладнання.
3. Ймовірнісні моделі надійності (експоненційний закон, розподіл Вейбулла).
4. Надійність систем із послідовно з'єднаних елементів.
5. Методи підвищення стабільності енергоспоживання та оцінювання ризиків.

Методичні рекомендації щодо виконання

Опрацювати ймовірнісні моделі надійності, обчислити імовірність безвідмовної роботи системи послідовних елементів та показник очікуваного ризику.

Розрахункові формули

$$R_1(t)=e^{(-\lambda_1 \cdot t)}; R_2(t)=e^{(-\lambda_2 \cdot t)}; R_3(t)=e^{(-\lambda_3 \cdot t)} \quad (1)$$

де $R_1(t)$ - імовірність безвідмовної роботи кожного з трьох елементів системи окремо.

$$R_{\text{сист}}(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_3(t) \quad (2)$$

де $R_{\text{сист}}(t)$ - імовірність безвідмовної роботи всієї послідовної системи.

$$\lambda_{\text{сист}} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \quad (3)$$

де $\lambda_{\text{сист}}$ - еквівалентна (сумарна) інтенсивність відмов системи (для експоненційного закону розподілу).

$$R_{\text{сист}}(t) = e^{(-\lambda_{\text{сист}} \cdot t)} \quad (4)$$

де $R_{\text{сист}}(t)$ - альтернативний (еквівалентний) спосіб обчислення надійності системи через сумарну інтенсивність відмов.

$$T_{\text{сер}} = 1/\lambda_{\text{сист}} \quad (5)$$

де $T_{\text{сер}}$ - середнє напруцювання системи на відмову.

$$P(\text{відмови}) = 1 - R_{\text{сист}}(t) \quad (6)$$

де $P(\text{відмови})$ - імовірність відмови системи за час t .

$$\text{Ризик} = P(\text{відмови}) \cdot V_{\text{наслідків}} \quad (7)$$

де Ризик - показник очікуваного ризику.

$$\text{Внесок } i = \lambda_i / \lambda_{\text{сист}} \cdot 100\% \quad (8)$$

де Внесок i - частка i -го елемента в сумарній інтенсивності відмов системи – визначає найслабшу ланку.

Приклад розрахунку

Система теплопостачання: $\lambda_1=0,0008$, $\lambda_2=0,0012$, $\lambda_3=0,0006$ год⁻¹. $t=300$ год, $V_{\text{наслідків}}=200$ тис. грн.

1) $\lambda_{\text{сист}}=0,0008+0,0012+0,0006=0,0026$ год⁻¹.

2) $R_{\text{сист}}(300)=e^{(-0,0026 \cdot 300)}=e^{(-0,78)}=0,458$.

3) $T_{\text{сер}}=1/0,0026=384,6$ год.

4) $P(\text{відмови})=1-0,458=0,542$.

5) $\text{Ризик}=0,542 \cdot 200=108,4$ тис. грн.

6) Внески: елемент 2 ($\lambda_2=0,0012$) дає $0,0012/0,0026 \cdot 100\%=46,2\%$ сумарної інтенсивності відмов – найслабша ланка системи.

Висновок: саме елемент 2 (найімовірніше, компресор чи котел) визначає основний ризик системи і має пріоритет при плануванні резервування чи модернізації.

Завдання для самостійного виконання

За заданими інтенсивностями відмов трьох послідовних елементів системи обчислити сумарну інтенсивність $\lambda_{\text{сист}}$, імовірність безвідмовної роботи $R_{\text{сист}}(t)$, середнє напрацювання $T_{\text{сер}}$, показник очікуваного ризику та частку кожного елемента у сумарній інтенсивності відмов. Визначити найслабшу ланку системи.

Вар	Обладнання	λ_1 , год ⁻¹	λ_2 , год ⁻¹	λ_3 , год ⁻¹	t , год	$V_{\text{наслідків}}$, тис. грн
1	Лінія обробки зерна (котел+мережа+споживач)	0.0008	0.0012	0.0006	300	200
2	Холодильна станція (компресор+трубопровід+камера)	0.00084	0.00126	0.00063	315	212
3	Котельня (пальник+теплообмінник+насос)	0.00088	0.00132	0.00066	330	224

Вар	Обладнання	λ_1 , год ⁻¹	λ_2 , год ⁻¹	λ_3 , год ⁻¹	t, год	Vнаслідків , тис. грн
4	Вентиляційна система	0.0009 2	0.0013 8	0.0006 9	34 5	236
5	Доїльна установка	0.0009 6	0.0014 4	0.0007 2	36 0	248
6	Кормовиробничий комплекс	0.001	0.0015	0.0007 5	37 5	260

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення надійності енергоощадної технологічної системи.
2. Які причини відмов і збоїв характерні для енергетичного обладнання?
3. Опишіть три періоди кривої життя інтенсивності відмов.
4. Як обчислюється показник очікуваного ризику енергетичної нестабільності?
5. Які методи застосовують для підвищення надійності енергетичного обладнання?
6. Як визначається імовірність безвідмовної роботи системи з послідовних елементів?
7. Як визначити найслабшу ланку послідовної системи за внеском у сумарну інтенсивність відмов?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 10

Сучасні системи енергетичного аудиту в агровиробництві

Мета роботи

Ознайомитися із сучасними системами енергетичного аудиту в агровиробництві та оволодіти методикою побудови контрольної карти й розрахунку індексів C_p , C_{pk} .

Питання для самостійного опрацювання

1. Системи енергетичного менеджменту та цикл PDCA.
2. Оперативний контроль і моніторинг енергоспоживання процесів.
3. Контрольні карти Шухарта та їх застосування в енергетичному аудиті.
4. Індеси відтворюваності процесу C_p та C_{pk} .
5. Стандартизація процедур енергетичного аудиту (ISO 50002).

Методичні рекомендації щодо виконання

Ознайомитися з принципами побудови контрольних карт Шухарта та енергетичного аудиту, розрахувати контрольні межі та індеси відтворюваності C_p , C_{pk} за наведеними даними.

Розрахункові формули

$$UCL = \bar{e} + A_2 \cdot \bar{R} \quad (1)$$

де UCL - верхня контрольна межа; $A_2=0,58$ для вибірки $n=5$ (табличне значення).

$$LCL = \bar{e} - A_2 \cdot \bar{R} \quad (2)$$

де LCL - Нижня контрольна межа.

$$C_p = (USL - LSL)/(6\sigma) \quad (3)$$

де C_p - індекс відтворюваності процесу; USL , LSL – межі поля допуску.

$$C_{pu} = (USL - \bar{e})/(3\sigma) \quad (4)$$

де C_{pu} - односторонній індекс відтворюваності відносно верхньої межі.

$$C_{pl} = (\bar{e} - LSL)/(3\sigma) \quad (5)$$

де C_{pl} - односторонній індекс відтворюваності відносно нижньої межі.

$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl}) \quad (6)$$

де C_{pk} - індекс налаштованості процесу, що враховує можливе зміщення середнього значення.

$$T_{ц} = (USL + LSL) / 2 \quad (7)$$

де $T_{ц}$ - центр поля допуску.

$$\text{Зміщення} = \bar{e} - T_{ц} \quad (8)$$

де Зміщення - абсолютне зміщення середнього значення процесу відносно центру поля допуску.

Приклад розрахунку

$\bar{e}=40$, $\bar{R}=4,0$, $USL=46$, $LSL=34$, $\sigma=1,6$. $UCL=40+0,58 \cdot 4,0=42,3$. $LCL=40-2,3=37,7$.

$C_p=(46-34)/(6 \cdot 1,6)=12/9,6=1,25$ – процес потенційно здатний відповідати допуску ($C_p \geq 1,33$ бажано, тут дещо нижче ідеалу).

$C_{pu}=(46-40)/(3 \cdot 1,6)=6/4,8=1,25$. $C_{pl}=(40-34)/(3 \cdot 1,6)=6/4,8=1,25$. $C_{pk}=\min(1,25; 1,25)=1,25$.

$T_{ц}=(46+34)/2=40$. $\text{Зміщення}=40-40=0$ – процес центрований ($C_p=C_{pk}$, зміщення відсутнє).

Висновок: процес близький до задовільного рівня відтворюваності ($C_p=1,25$), центрований відносно поля допуску; для досягнення рекомендованого $C_p \geq 1,33$ необхідне подальше зниження варіативності σ .

Завдання для самостійного виконання

За заданими даними обчислити контрольні межі UCL/LCL ; обчислити індекси C_p , C_{pu} , C_{pl} , C_{pk} ; визначити зміщення середнього значення процесу відносно центру поля допуску. Зробити висновок про стабільність і центрованість процесу.

Вар.	Параметр контролю	$\bar{e} (\bar{X})$	$\bar{R}$	USL	LSL	σ
1	Питоме енергоспоживання лінії	40	4	46	34	1.6
2	Температура сушіння зерна	41.5	4.15	47.6	35.2	1.66
3	Питомі витрати палива котла	43	4.3	49.2	36.4	1.72

Вар.	Параметр контролю	$\bar{x}$ ($\bar{X}$)	$\bar{R}$	USL	LSL	σ
4	Питоме споживання компресора	44.5	4.45	50.8	37.6	1.78
5	Вологість продукту на виході	46	4.6	52.4	38.8	1.84
6	Температура пастеризації	47.5	4.75	54	40	1.9

Питання для самоконтролю

1. Що таке система енергетичного менеджменту і на яких принципах вона ґрунтується (цикл PDCA)?
2. Як обчислюються контрольні межі UCL/LCL контрольної карти?
3. Що показує індекс відтворюваності процесу C_p ?
4. Які коригувальні дії застосовуються за перевищення нормативного енергоспоживання?
5. Яку роль відіграє стандартизація процедур енергетичного аудиту (ISO 50002)?
6. У чому різниця між індексами C_p і C_{pk} ?
7. Що означає зміщення середнього значення процесу відносно центру поля допуску?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 11

Сучасні підходи до інженерного проєктування енергоощадного обладнання

Мета роботи

Дослідити сучасні підходи до інженерного проєктування енергоощадного обладнання та оволодіти методикою економічного обґрунтування енергоощадних рішень.

Питання для самостійного опрацювання

1. Етапи інженерного проєктування енергоощадних рішень.
2. Критерії вибору енергоефективних технічних рішень.
3. Методи економічного обґрунтування (строк окупності, NPV, PI).
4. Інноваційні підходи: когенерація, теплові насоси, цифрові системи керування.
5. Аналіз альтернативних варіантів енергоощадних рішень.

Методичні рекомендації щодо виконання

Підготувати огляд сучасних інженерних рішень з підвищення енергоефективності, обчислити строк окупності та чисту приведену вартість (NPV) запропонованого енергоощадного заходу.

Розрахункові формули

$$\text{Ток} = K / \Delta B \quad (1)$$

де Ток - простий строк окупності капітальних вкладень.

$$PVA(r,n) = (1 - (1+r)^{-n})/r \quad (2)$$

де $PVA(r,n)$ - коефіцієнт приведення анuitету (множник для дисконтування рівномірного грошового потоку).

$$NPV = \Delta B \cdot PVA(r,n) - K \quad (3)$$

де NPV - чиста приведена вартість проєкту за постійного щорічного грошового потоку ΔB .

$$PI = (NPV + K)/K \quad (4)$$

де PI - індекс прибутковості проєкту (Profitability Index).

$$\text{Ток.дисконт} = K / (\Delta B / (1+r/2)) \quad (5)$$

де Ток.дисконт - наближена оцінка дисконтованого строку окупності (спрощена поправка на вартість грошей у часі).

$$\text{Сумарний ефект} = \Delta B \cdot n - K \quad (6)$$

де Сумарний ефект - недисконтований сумарний ефект проєкту за n років.

$$IRR = r, \text{ за якого } NPV=0 \quad (7)$$

де $IRR = r$ - внутрішня норма дохідності – оцінюється підбором ставки r , за якої NPV звертається в нуль (орієнтовно, без точного розрахунку).

$$\text{Рентабельність річна} = \Delta B / K \cdot 100\% \quad (8)$$

де Рентабельність річна - проста річна рентабельність інвестиції.

Приклад розрахунку

$K=420$ тис. грн, $\Delta B=140$ тис. грн/рік, $r=15\%$, $n=7$ років.

1) $Tок=420/140=3,0$ роки.

2) $PVA(15\%;7)=(1-1,15^{-7})/0,15=4,16$.

3) $NPV=140 \cdot 4,16 - 420 = 582,9 - 420 = 162,9$ тис. грн.

4) $PI=(162,9+420)/420=1,388$ – на кожную гривню вкладень проєкт дає 1,388 грн приведеної вартості.

5) Сумарний недисконтований ефект $=140 \cdot 7 - 420 = 980 - 420 = 560$ тис. грн.

6) Рентабельність_річна $=140/420 \cdot 100\% = 33,3\%$.

Висновок: проєкт економічно доцільний ($NPV>0$, $PI>1$), із помірним строком окупності 3 роки та високою річною рентабельністю.

Завдання для самостійного виконання

За заданими капітальними вкладеннями, річною економією, ставкою дисконтування та горизонтом розрахунку обчислити Ток, $PVA(r,n)$, NPV , індекс прибутковості PI , сумарний недисконтований ефект та просту річну рентабельність. Зробити висновок про економічну доцільність проєкту.

Вар	Захід	К, тис. грн	ΔB , тис. грн/рік	r , %	n , років
1	Рекуперація тепла вентвипусків	300	100	14	6
2	Частотне регулювання насосної станції	325	108	14.5	7
3	Модернізація теплоізоляції котельні	350	116	15	8

Вар	Захід	К, тис. грн	ΔB , тис. грн/рік	r, %	n, років
4	Встановлення економайзера котла	375	124	15.5	9
5	Заміна освітлення на світлодіодне	400	132	16	10
6	Впровадження теплового насоса	425	140	16.5	11

Питання для самоконтролю

1. Перелічіть основні етапи інженерного проєктування енергоощадних рішень.
2. Як обчислюється строк окупності капітальних вкладень в енергоощадний захід?
3. Що таке чиста приведена вартість (NPV) проєкту?
4. Які критерії застосовуються для аналізу альтернативних енергоощадних варіантів?
5. Наведіть приклади інноваційних підходів до підвищення енергоефективності (когенерація, теплові насоси).
6. Що показує індекс прибутковості проєкту (PI)?
7. Чим відрізняється простий строк окупності від дисконтованого?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 12

Конструкційні особливості енергоефективного обладнання переробних підприємств

Мета роботи

Систематизувати знання про конструкційні особливості енергоефективного обладнання переробних підприємств та оволодіти теплотехнічним розрахунком огорожувальних конструкцій.

Питання для самостійного опрацювання

1. Принципи конструювання енергоощадного обладнання.
2. Класифікація енергоефективних робочих органів і вузлів.
3. Вимоги до енергоощадних конструкцій обладнання харчової промисловості.
4. Вибір матеріалів з урахуванням теплоефективності.
5. Теплотехнічний розрахунок багатошарових огорожувальних конструкцій.

Методичні рекомендації щодо виконання

Опрацювати вимоги до енергоощадних конструкцій обладнання АПВ, виконати теплотехнічний розрахунок заданої двошарової огорожувальної конструкції.

Розрахункові формули

$$R_1 = \delta_1/\lambda_1; R_2 = \delta_2/\lambda_2 \quad (1)$$

де R_1 - термічні опори першого та другого шарів конструкції.

$$\Sigma R = R_1 + R_2 \quad (2)$$

де ΣR - сумарний термічний опір конструкції.

$$k = 1/(1/\alpha_1 + \Sigma R + 1/\alpha_2) \quad (3)$$

де k - коефіцієнт теплопередачі конструкції.

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t \quad (4)$$

де Q - тепловий потік через конструкцію.

$$R_0 = 1/\alpha_1 + \Sigma R + 1/\alpha_2 \quad (5)$$

де R_0 - повний термічний опір конструкції (обернений до k).

$$W_{\text{рік}} = Q \cdot 8760/1000 \quad (6)$$

де $W_{\text{рік}}$ - орієнтовні річні теплові втрати через конструкцію за цілорічної експлуатації, МВт·год (спрощено, без урахування сезонності).

$$V_{\text{втр}} = W_{\text{рік}} \cdot \Pi \quad (7)$$

де $V_{\text{втр}}$ - вартість річних теплових втрат; Π – тариф на теплову енергію, приймати 1,8 тис. грн/МВт·год для орієнтовного розрахунку.

$$\Delta Q(\delta_2 \text{ доп}) = k' \cdot F \cdot \Delta t - Q \quad (8)$$

де $\Delta Q(\delta_2 \text{ доп})$ - зниження теплового потоку при збільшенні товщини другого шару на 50% (k' обчислюється аналогічно з новим $R_2' = 1,5 \cdot R_2$).

Приклад розрахунку

$\delta_1 = 100$ мм, $\lambda_1 = 0,045$ Вт/(м·К); $\delta_2 = 10$ мм (метал), $\lambda_2 = 46,5$ Вт/(м·К); $\alpha_1 = 8$, $\alpha_2 = 20$ Вт/(м²·К); $F = 40$ м², $\Delta t = 45$ К.

1) $R_1 = 0,1/0,045 = 2,222$; $R_2 = 0,01/46,5 = 0,00022$ (практично нехтовний опір металевому шару). $\Sigma R = 2,222$.

2) $k = 1/(1/8 + 2,222 + 1/20) = 1/(0,125 + 2,222 + 0,05) = 1/2,397 = 0,417$ Вт/(м²·К).

3) $Q = 0,417 \cdot 40 \cdot 45 = 750,6$ Вт.

4) $W_{\text{рік}} = 750,6 \cdot 8760/1000 = 6575$ МВт·год (умовне значення для орієнтовного розрахунку, без урахування сезонності роботи).

5) $V_{\text{втр}} = 6575 \cdot 1,8 = 11835$ тис. грн (умовна оцінка для цілорічної роботи) – насправді розрахунок слід коригувати на фактичну тривалість опалювального періоду.

Завдання для самостійного виконання

За заданими параметрами двошарової конструкції обчислити термічні опори шарів, коефіцієнт теплопередачі k , тепловий потік Q ; оцінити орієнтовні річні теплові втрати $W_{\text{рік}}$ та їх вартість $V_{\text{втр}}$ за наведеним тарифом; обчислити зменшення теплового потоку при збільшенні товщини теплоізоляційного шару на 50%.

Вар	Конструкція	δ_1 , мм; λ_1	δ_2 , мм; λ_2	α_1 , α_2	F , м²; Δt , К
1	Стіна сушильної камери	100;0,045	10;46,5	8;20	40;45
2	Стіна холодильної камери	120;0,035	8;50	7;18	60;25
3	Дах тваринницького приміщення	150;0,040	12;45	9;22	300;30

Вар	Конструкція	δ_1 , мм; λ_1	δ_2 , мм; λ_2	α_1, α_2	F, м ² ; Δt , К
4	Ізоляція труб теплотраси	80;0,038	6;40	8;20	20;60
5	Стіна котельні	110;0,042	10;46	7;19	50;35
6	Стіна пастеризаційного цеху	90;0,036	9;45	8;21	35;40

Питання для самоконтролю

1. Сформулюйте основні принципи конструювання енергоощадного обладнання.
2. Наведіть класифікацію енергоефективних робочих органів обладнання АПВ.
3. Як обчислюється коефіцієнт теплопередачі багатошарової конструкції?
4. Що таке «місток холоду» і як його уникають при проєктуванні?
5. Якими теплофізичними властивостями визначається вибір матеріалу для енергоощадного обладнання?
6. Як термічний опір шару матеріалу залежить від його товщини та коефіцієнта теплопровідності?
7. Як оцінити економічний ефект від збільшення товщини теплоізоляційного шару?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 13

Моделювання енергетичних навантажень і втрат енергії

Мета роботи

Поглибити знання методів моделювання енергетичних навантажень і втрат енергії та оволодіти складанням енергетичного балансу обладнання.

Питання для самостійного опрацювання

1. Види енергетичних навантажень обладнання.
2. Моделі стаціонарної та нестаціонарної теплопередачі.
3. Закономірності втрат енергії в тепловому та приводному обладнанні.
4. Розрахунок і перевірка енергетичного балансу установки.
5. Можливості комп'ютерного (CFD, CAE) моделювання енергетичних процесів.

Методичні рекомендації щодо виконання

Дослідити види енергетичних навантажень та закономірності втрат енергії, скласти енергетичний баланс заданої теплотехнічної установки та обчислити її ККД.

Розрахункові формули

$$\Sigma Q_{\text{втр}} = Q_{\text{втр}1} + Q_{\text{втр}2} + Q_{\text{втр}3} \quad (1)$$

де $\Sigma Q_{\text{втр}}$ - сумарні втрати енергії установки.

$$Q_{\text{баланс}} = Q_{\text{кор}} + \Sigma Q_{\text{втр}} \quad (2)$$

де $Q_{\text{баланс}}$ - перевірка балансу; повинно дорівнювати $Q_{\text{підв}}$ (з допустимою похибкою).

$$\text{Похибка} = (Q_{\text{підв}} - Q_{\text{баланс}}) / Q_{\text{підв}} \cdot 100\% \quad (3)$$

де Похибка - відносна похибка балансу (нев'язка), у нормі не повинна перевищувати кількох відсотків.

$$\eta = Q_{\text{кор}} / Q_{\text{підв}} \cdot 100\% \quad (4)$$

де η - ККД установки.

$$d_i = Q_{\text{втр}i} / \Sigma Q_{\text{втр}} \cdot 100\% \quad (5)$$

де d_i - Частка i -ї статті втрат у загальній сумі втрат.

$$d'i = Q_{\text{втр}i} / Q_{\text{підв}} \cdot 100\% \quad (6)$$

де $d'i$ - частка i -ї статті втрат відносно підведеної енергії.

$$\eta_{\text{пот}} = (Q_{\text{підв}} - \max(Q_{\text{втр}i})) / Q_{\text{підв}} \cdot 100\% \quad (7)$$

де $\eta_{\text{пот}}$ - потенційний ККД за умови повного усунення найбільшої статті втрат.

$$\text{Приріст } \eta = \eta_{\text{пот}} - \eta \quad (8)$$

де Приріст η - очікуваний приріст ККД при усуненні найбільшої статті втрат.

Приклад розрахунку

$Q_{\text{підв}}=1000$ кВт, $Q_{\text{кор}}=780$ кВт, $Q_{\text{втр1(гази)}}=130$,
 $Q_{\text{втр2(обмурівка)}}=55$, $Q_{\text{втр3(продувка)}}=25$ кВт.

1) $\Sigma Q_{\text{втр}}=130+55+25=210$.

2) $Q_{\text{баланс}}=780+210=990$.

Похибка= $(1000-990)/1000 \cdot 100\%=1,0\%$ – прийнятна нев'язка балансу.

3) $\eta=780/1000 \cdot 100\%=78\%$.

4) Частки: $d_1=130/210 \cdot 100\%=61,9\%$; $d_2=55/210 \cdot 100\%=26,2\%$;
 $d_3=25/210 \cdot 100\%=11,9\%$.

5) Відносно підведеної: $d'_1=13\%$; $d'_2=5,5\%$; $d'_3=2,5\%$.

6) Найбільша стаття втрат – газів ($Q_{\text{втр1}}=130$ кВт).

7) $\eta_{\text{пот}}=(1000-130)/1000 \cdot 100\%=87\%$ (за умови повного усунення втрат з газами, що нереалістично, але дає верхню межу потенціалу). Приріст $\eta=87-78=9$ в. п. – обґрунтовує пріоритетність встановлення економайзера.

Завдання для самостійного виконання

За заданими складовими енергетичного балансу перевірити баланс (обчислити похибку), обчислити ККД установки η , структуру часток втрат d_i та d'_i ; визначити найбільшу статтю втрат і обчислити потенційний приріст ККД при її повному усуненні.

Варіант	Установка	$Q_{\text{підв}}$, кВт	$Q_{\text{кор}}$, кВт	$Q_{\text{втр1}}$, кВт	$Q_{\text{втр2}}$, кВт	$Q_{\text{втр3}}$, кВт
1	Паровий котел	1000	780	130	55	25
2	Зерносушарка	1060	825	138	58	26.5
3	Пастеризатор	1120	870	146	61	28
4	Холодильна установка	1180	915	154	64	29.5

Варіант	Установка	Qпідв, кВт	Qкор, кВт	Qвтр1, кВт	Qвтр2, кВт	Qвтр3, кВт
5	Водогрійний котел	1240	960	162	67	31
6	Випарна установка	1300	1005	170	70	32.5

Питання для самоконтролю

1. Що таке енергетичний баланс установки і як він розраховується?
2. Як обчислюється ККД установки за результатами енергетичного балансу?
3. Які основні статті втрат характерні для теплового обладнання?
4. Які можливості надає CFD-моделювання для аналізу енергетичних процесів?
5. Чому важливо перевіряти баланс (рівність підведеної енергії сумі складових)?
6. Як визначається потенційний ККД установки за умови усунення найбільшої статті втрат?
7. Яка допустима похибка (нев'язка) енергетичного балансу вважається прийнятною?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 14

Аналіз експлуатаційних даних для підвищення енергоефективності техніки

Мета роботи

Оволодіти методикою аналізу експлуатаційних даних для підвищення енергоефективності техніки на основі статистичних методів (розподіл Вейбулла).

Питання для самостійного опрацювання

1. Аналіз експлуатаційних даних енергоспоживання обладнання.
2. Методи виявлення джерел втрат енергії (тепловізійне обстеження, ультразвукова діагностика).
3. Методи енергетичної модернізації обладнання.
4. Застосування розподілу Вейбулла для аналізу статистики відмов.
5. Заходи з підвищення енергоефективного ресурсу обладнання.

Методичні рекомендації щодо виконання

Систематизувати методи статистичного аналізу експлуатаційних даних, за параметрами розподілу Вейбулла оцінити ймовірність відмови обладнання та рекомендовану періодичність обслуговування.

Розрахункові формули

$$\Delta e(t) = e_0 + k \cdot t \quad (1)$$

де $\Delta e(t)$ - питомі витрати енергії через t місяців після обслуговування.

$$\text{ПрирістВІДН}(t) = (\Delta e(t) - e_0) / e_0 \cdot 100\% \quad (2)$$

де $\text{ПрирістВІДН}(t)$ - відносний приріст питомих витрат за час t .

$$t^* : e_0 + k \cdot t^* = e_0 \cdot (1 + \text{Поріг}/100) \quad (3)$$

де $t^* : e_0 + k \cdot t^*$ - рекомендований інтервал обслуговування (час досягнення допустимого порогу зростання).

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (4)$$

де $F(t)$ - функція розподілу Вейбулла (ймовірність відмови до напрацювання t).

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (5)$$

де $R(t)$ - імовірність безвідмовної роботи за розподілом Вейбулла.

$$T_{\text{сер}} = \eta \cdot \Gamma(1+1/\beta) \quad (6)$$

де $T_{\text{сер}}$ - середнє напрацювання до відмови (Γ – гамма-функція; для орієнтовного розрахунку приймати $\Gamma(1+1/\beta)=0,90$ за $\beta=1,6\dots 2,0$).

$$\lambda(t) = (\beta/\eta) \cdot (t/\eta)^{(\beta-1)} \quad (7)$$

де $\lambda(t)$ - інтенсивність відмов у момент часу t (зростаюча за $\beta>1$, що відповідає зношуванню).

$$F(t^*) \quad (8)$$

де $F(t^*)$ - імовірність відмови обладнання до моменту рекомендованого обслуговування t^* – орієнтир для оцінки ризику несвоєчасної заміни.

Приклад розрахунку

$e_0=15$ кВт·год/т, $k=0,3$ кВт·год/(т·міс), поріг=12%. $\eta=500$ год, $\beta=1,6$.

1) t^* : $15+0,3t^*=15 \cdot 1,12=16,8 \rightarrow 0,3t^*=1,8 \rightarrow t^*=6$ місяців – рекомендована періодичність обслуговування.

2) $F(500)=1-e^{-(500/500)^{1,6}}=1-e^{-1}=1-0,368=0,632$ – ймовірність відмови до напрацювання 500 год становить 63,2%.

3) $T_{\text{сер}}=500 \cdot 0,90=450$ год (орієнтовна оцінка).

4) $\lambda(500)=(1,6/500) \cdot (500/500)^{0,6}=0,0032 \cdot 1=0,0032$ год⁻¹ – інтенсивність відмов на момент $t=\eta$.

Висновок: рекомендована періодичність технічного обслуговування – 6 місяців; висока ймовірність відмови (63,2%) до напрацювання 500 год підтверджує доцільність планового обслуговування задовго до цього напрацювання.

Завдання для самостійного виконання

За заданими параметрами моделі зростання питомих витрат обчислити рекомендовану періодичність обслуговування t^* ; за параметрами розподілу Вейбулла обчислити $F(\eta)$, $R(\eta)$, середнє напрацювання $T_{\text{сер}}$ та інтенсивність відмов $\lambda(\eta)$. Зробити висновок про співвідношення рекомендованої періодичності обслуговування й імовірності відмови обладнання.

Вар.	Обладнання	e_0 , кВт·год/т	k , кВт·год/(т·міс)	Поріг, %	η , параметр Вейбулла	β , параметр Вейбулла
1	Пастеризатор	15	0.3	12	500	1.6
2	Компресор холодильної установки	16	0.33	13	525	1.68
3	Котел	17	0.36	14	550	1.76
4	Теплообмінник молочної лінії	18	0.39	15	575	1.84
5	Насос оборотного водопостачання	19	0.42	16	600	1.92
6	Вентилятор зернохранилища	20	0.45	17	625	2

Питання для самоконтролю

1. Які джерела даних використовують для аналізу експлуатаційного енергоспоживання обладнання?
2. Якими методами виявляють джерела підвищених втрат енергії в обладнанні?
3. Як застосовується розподіл Вейбулла для оцінювання ресурсу енергетичного обладнання?
4. Як на основі моделі зростання питомих витрат обґрунтовується періодичність обслуговування?
5. Які заходи сприяють підвищенню енергоефективного ресурсу обладнання?
6. Що означає параметр форми β розподілу Вейбулла і як він впливає на характер відмов?
7. Як пов'язані рекомендована періодичність обслуговування та ймовірність відмови обладнання?

САМОСТІЙНА РОБОТА № 15

Відновлювані джерела енергії у проектуванні енергоефективних виробничих систем

Мета роботи

Ознайомитися з використанням відновлюваних джерел енергії у проектуванні енергоефективних виробничих систем та оволодіти розрахунком біогазової установки.

Питання для самостійного опрацювання

1. Відновлювані джерела енергії на переробних і тваринницьких підприємствах.
2. Принцип роботи біогазової установки та когенерації.
3. Системи рекуперації тепла та енергії.
4. Інтеграція відновлюваних джерел з традиційними системами енергозабезпечення.
5. Коефіцієнт енергетичної автономності підприємства та перспективи його підвищення.

Методичні рекомендації щодо виконання

Ознайомитися з можливостями використання відновлюваних джерел енергії на підприємствах АПВ, виконати розрахунок виходу біогазу та коефіцієнта енергетичної автономності заданого підприємства.

Розрахункові формули

$$V_{\text{біогазу}} = m \cdot b \quad (1)$$

де $V_{\text{біогазу}}$ - добовий вихід біогазу; m – маса сухої органічної речовини, кг/добу; b – питомий вихід біогазу, м³/кг.

$$E_{\text{тепл підв}} = V_{\text{біогазу}} \cdot Q_{\text{н}} \quad (2)$$

де $E_{\text{тепл підв}}$ - повна теплотворна енергія добового обсягу біогазу, МДж/добу.

$$E_{\text{е}} = E_{\text{тепл підв}} \cdot \eta_{\text{е}} \quad (3)$$

де $E_{\text{е}}$ - обсяг виробленої електроенергії когенераційною установкою, МДж/добу.

$$E_{\text{е}}(\text{кВт} \cdot \text{год}) = E_{\text{е}} / 3,6 \quad (4)$$

де $E_{\text{е}}(\text{кВт} \cdot \text{год})$ - переведення обсягу електроенергії з МДж у кВт·год.

$$Q_{\text{супутня}} = E_{\text{тепл підв}} \cdot (1 - \eta_{\text{е}}) \cdot \eta_{\text{т}} \quad (5)$$

де $Q_{\text{супутня}}$ - обсяг корисної супутньої теплоти когенерації;
 η_t – коефіцієнт використання скидної теплоти (приймати 0,45 для орієнтовного розрахунку).

$$K_a = E_e(\text{кВт}\cdot\text{год}) / E_{\text{заг}} \quad (6)$$

де K_a - коефіцієнт енергетичної автономності підприємства за електроенергією.

$$E_{\text{дефіцит}} = E_{\text{заг}} - E_e(\text{кВт}\cdot\text{год}) \quad (7)$$

де $E_{\text{дефіцит}}$ - залишковий дефіцит електроенергії, що покривається з традиційних джерел.

$$V_{\text{екон}} = E_e(\text{кВт}\cdot\text{год}) \cdot \Pi \quad (8)$$

де $V_{\text{екон}}$ - вартісна оцінка заміщеної електроенергії; Π – тариф на електроенергію, приймати 4,5 грн/кВт·год для орієнтовного розрахунку.

Приклад розрахунку

$m=7000$ кг/добу, $b=0,28$ м³/кг, $Q_H=21$ МДж/м³, $\eta_e=36\%$,
 $E_{\text{заг}}=6500$ кВт·год/добу.

1) $V_{\text{біогазу}}=7000\cdot0,28=1960$ м³/добу.

2) $E_{\text{тепл підв}}=1960\cdot21=41160$ МДж/добу.

3) $E_e=41160\cdot0,36=14818$ МДж/добу.

4) $E_e(\text{кВт}\cdot\text{год})=14818/3,6=4116$ кВт·год/добу.

5) $K_a=4116/6500=0,633$ – установка покриває 63,3% потреби підприємства в електроенергії.

6) $E_{\text{дефіцит}}=6500-4116=2384$ кВт·год/добу – залишковий обсяг, що постачається з мережі.

7) $V_{\text{екон}}=4116\cdot4,5=18522$ грн/добу – вартість заміщеної електроенергії.

Завдання для самостійного виконання

За заданими масою сировини, питомим виходом біогазу та теплотехнічними параметрами обчислити добовий вихід біогазу, обсяг виробленої електроенергії E_e , коефіцієнт енергетичної автономності K_a , залишковий дефіцит електроенергії та вартісну оцінку заміщеної електроенергії. Зробити висновок про доцільність впровадження установки.

Вар.	Підприємство	m, кг/добу	b, м³/кг	Qн, МДж/м³	ηе, %	Езаг, кВт·год/добу
1	Тваринницький комплекс (ВРХ)	7000	0.28	21	36	6500
2	Свинокомплекс	7350	0.295	21.4	37.2	6750
3	Птахофабрика	7700	0.31	21.8	38.4	7000
4	Молочна ферма	8050	0.325	22.2	39.6	7250
5	Комплекс ВРХ м'ясного напрямку	8400	0.34	22.6	40.8	7500
6	Вівцеферма	8750	0.355	23	42	7750

Питання для самоконтролю

1. Які відновлювані джерела енергії доцільно використовувати на переробних і тваринницьких підприємствах?
2. Від яких факторів залежить питомий вихід біогазу?
3. Як обчислюється обсяг електроенергії, виробленої когенераційною установкою?
4. Що таке коефіцієнт енергетичної автономності підприємства?
5. Чому навіть за високого коефіцієнта автономності підприємству потрібен резерв традиційних джерел енергії?
6. Як обчислюється обсяг супутньої корисної теплоти когенераційної установки?
7. Як оцінити вартісний ефект від заміщення традиційної електроенергії власною генерацією?

Список використаних джерел

1. Зубко В. М. Агроінжиніринг : навчальний посібник для здобувачів вищої освіти спеціальностей 208 «Агроінженерія», 202 «Агрономія». Суми : СНАУ, 2022. 468 с.
2. Надійність машин та обладнання. Частина 1. Оцінка та забезпечення надійності машин та обладнання : навч. посібник / А. В. Новицький та ін. Київ : НУБіП, 2023. 209 с.
3. Мигаль В. Д., Шуляк М. Л., Шевченко І. О. Інтелектуальні системи тракторів і автомобілів, сервісний супровід : підручник. Харків : ДБТУ ; Майдан, 2023. 246 с.
4. Лебедев А. Т., Шуляк М. Л., Зубко В. М., Лебедев С. А. Будова тракторів John Deere серії 6, 8, 9 : підручник для здобувачів освіти зі спеціальності 208 «Агроінженерія», за ред. А.Т. Лебедева. Суми :СНАУ, 2024. 210 с.
5. Конструкції і розрахунки машин та апаратів переробних виробництв : підручник / В. С. Бойко та ін. Мелітополь : Таврійський державний агротехнологічний університет ім. Дмитра Моторного, 2021. 308 с.
- 6.Бабенко Д. В., Доценко Н. А., Горбенко О. А. Дослідження конструктивних і кінематичних характеристик енергоефективного олійного пресу. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2024. Вип. 28(3). С. 41-54. DOI: 10.56407/bs.agrarian/3.2024.41
- 7.Бабенко Д. В., Доценко Н. А., Горбенко О. А., Бацуровська І. В. Дослідження характеру руху подрібненої маси по поверхні решіт сепаратора насіння овочевих та баштанних культур. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2023. Вип. 27(4). С. 18-35. DOI: <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/4.2023.18>.
8. Технологія викладання загальнотехнічних дисциплін в умовах цифрового навчального середовища аграрних закладів вищої освіти: монографія / Д. В. Бабенко, Н. А. Доценко, О. А. Горбенко та ін. Миколаїв : МНАУ, 2025. 280 с. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/20871>.
9. Babenko D., Baczurowskaya I., Gorbenko O. Determination of the parameters of the use of water-lifting equipment in the conditions of

livestock farms. *Ukrainian black sea region agrarian science*. 2022. Vol. 26, no. 3. URL: [https://doi.org/10.56407/2313-092x/2022-26\(3\)-3](https://doi.org/10.56407/2313-092x/2022-26(3)-3).

10. Babenko D., Dotsenko N., Gorbenko O. Justification of the design parameters of improved equipment for tomato processing. *Ukrainian Black Sea region agrarian science*. 2025. Vol. 29, no. 3. P. 9–22. URL: <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/3.2025.09>.

Навчальне видання

**Енергоефективні та ресурсоощадні технології переробних і
тваринницьких підприємств:
методичні рекомендації для виконання самостійних робіт**

Укладач: **Горбенко** Олена Андріївна

Редактор: О. А. Горбенко

Комп'ютерний набір: О. А. Горбенко

Дизайн і верстка: О. А. Горбенко

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 3,25

Тираж 15 прим. Зам. №_

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного аграрного університету.
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9